近60 a黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征

安 彬[1,2]， 肖薇薇[1,2]， 朱 妮[1,2]， 刘宇峰[3]

（1. 安康学院旅游与资源环境学院/陕西省院士专家工作站，陕西 安康 725000； 2. 安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心，陕西 安康 725000； 3. 咸阳师范学院资源环境与历史文化学院，陕西 咸阳 712000）

摘 要：全球气候变暖背景下，厘清黄土高原地区降水集中度（*PCD*）和集中期（*PCP*）时空变化规律，对该区水土保持及水资源利用具有重要意义。基于1960—2019年黄土高原地区55个气象站点逐日降水观测资料，利用趋势分析、空间插值、相关分析等方法，分析了近60 a及退耕还林（草）工程前后黄土高原*PCD*与*PCP*时空变化特征。结果表明：（1）1960—2019年黄土高原年均降水量呈减少趋势，年均*PCD*逐渐减弱、*PCP*逐渐提前。（2）黄土高原地区年均降水量和*PCD*自东南向西北递减，*PCP*自东向西逐渐递减，但差异不大。*PCD*变化趋势自东北向西南呈"下降-上升-下降"相间分布，*PCP*表现出东部推迟、西部提前的态势。（3）退耕还林（草）工程后，黄土高原年均降水量增加、*PCD*减弱、*PCP*推迟。降水量自东向西呈"偏少-偏多"相间分布，其变化趋势以偏多为主；*PCD*自东北向西南呈"偏低-偏高-偏低"分布规律，其变化趋势以偏低为主；*PCP*以偏高为主，偏高幅度呈南多北少、东多西少态势，其趋势变化也以偏多为主。（4）1960—2019年黄土高原地区*PCD*、*PCP*与年降水量皆以正相关为主。

关键词：降水集中度（*PCD*）；降水集中期（*PCP*）；退耕还林（草）工程；生态分区；黄土高原

IPCC历次评估报告均代表当时人类对气候变化的最新认知水平，是国际社会应对气候变化行动的主要科学依据[1]。2021年8月9日，IPCC第六次评估报告第一工作组报告发布并指出：相较工业化前水平（1850—1900年），2010—2019年人类活动引起的全球平均表面温度约升高了1.07 ℃[2]。更多证据毋庸置疑地表明受人类活动影响已经使得全球大气、海洋和陆地变暖加剧，直接导致极端高温、持续性极端降水和极端干旱等典型极端气候事件发生的频率和强度急剧增加[3-5]，全球水资源可能呈现"干更干、湿更湿"的变化范式[6]，对经济社会可持续发展带来严峻挑战[3,7]。2021年7月18日08:00—22日08:00（北京时间），受黄淮低涡外围东风急流影响，郑州出现了历史罕见的极端暴雨天气，累积降水量为817.3 mm，24 h（20日04:00—21日04:00）降水量最大值为645.6 mm，降水的过度集中造成严重山体滑坡、泥石流、城市内涝及人员伤亡[8]。因此，在全球气候变化背景下，分析降水集中特性时空规律及成因等十分重要[9-10]。降水集中特性是降水量、降水持续时间和降水过程的综合反映[11]。目前，学界通常采用Zhang等[12-13]定义的降水集中度（Precipitation Concentration Degree, *PCD*）和降水集中期（Precipitation Concentration Period, *PCP*）、Martin[14]基于日尺度降水数据定义的降水集中度指数（Concentration Index, *CI*）、Oliver[15]和Michiels等[16]基于月尺度降水数据定义的降水集中指数（Precipitation Concentration Index, *PCI*）、王晾等[17]定义的降水集中程度（*Q*）等来分析降水集中特性。其中，*PCD*和*PCP*可同时量化降水的集中程度和集中时段[12-13]，该方法在相关研究中被广泛应用[10,18-20]。

黄土高原是世界上最大的黄土堆积区，造成该地区生态环境高度脆弱、水土流失严重，与其特殊的土壤结构、生态环境、降水集中且暴雨多等因素有关[21]。我国学者对黄土高原降水时空变化特征[22-23]、

收稿日期：2022-04-11； **修订日期：**2022-05-22

基金项目：陕西省科技厅项目（2021KRM033）；安康市科技局项目（AK2021-SF-04）；安康学院校内专项项目（2021AYKFKT03）

作者简介：安彬（1988-），男，副教授，研究方向为区域环境与GIS应用. E-mail: leyang1007@126.com

极端降水[24]、不同等级降水日数和强度[25]等方面做了较多研究,但对该地区年内降水分配特征的报道相对较少。刘宪锋等[26]利用1959—2008年逐日降水资料研究了黄土高原的降水集中度和集中期时空变化及其趋势特征。自1999年开始实施退耕还林(草)工程以来,黄土高原地表植被覆盖状况明显改善,且降水量增加[27],有效缓解了区域内的土壤侵蚀,但对黄土高原地区的降水集中度和集中期有何影响?鉴于此,本文利用1960—2019年逐日降水资料测算黄土高原地区*PCD*和*PCP*,并结合趋势分析、空间插值、相关分析等方法分析该地区降水不均匀时空变化特征,为全面正确认识黄土高原地区年内降水变化规律,合理利用水资源等提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

1960—2019年黄土高原地区逐日降水数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),依据气象站点年内缺失数据低于2%、观测时间最长、无搬迁等原则,最终确定了55个代表性气象站点(图1)。所有站点降水数据采用RHtest方法进行质量检查[28]。参考相关研究成果,将黄土高原划分为4个生态分区:高塬沟壑区(A)、丘陵沟壑区(B)、沙地农灌区(C)和土石河谷区(D),其数据来源于国家地球系统科学数据中心—黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn)。

1.2 研究方法

降水集中度(*PCD*)和降水集中期(*PCP*)的计算

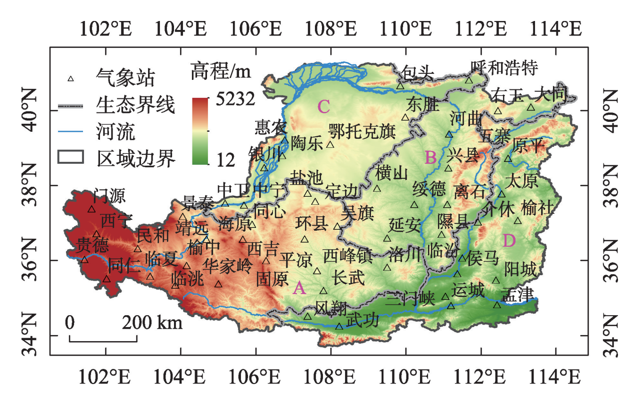


图1 黄土高原生态分区及气象站分布

Fig. 1 Ecological division and distribution of meteorological stations on the Loess Plateau

原理参照文献[12-13],把各站年内逐日降水量的数值看作向量的长度,而对应的日期则作为向量的方向,以此表征区域单站降水量年内非均匀分配特征,其计算公式为:

$$PCD_i = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \sin\theta_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \cos\theta_j\right)^2} \Big/ R_i \quad (1)$$

$$PCP_i = \arctan\left(\sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \sin\theta_j \Big/ \sum_{j=1}^{N} r_{ij} \times \cos\theta_j\right) \quad (2)$$

$$\theta_j = 360° \times (j-1)/365\ (平年)$$
$$\theta_j = 360° \times (j-1)/366\ (闰年) \quad (3)$$

式中:j为年内逐日对应的日序数(j=1, 2, 3, …, 365或366);i为年份(i=1960, 1961, 1962, …, 2019);r_{ij}表示日降水量(mm);R_i表示第i年降水总量(mm);θ_j为年内逐日对应的方位角。

根据公式(1)和(2)可知,*PCD*反映了年降水量在年内的集中程度,取值介于0~1之间;当*PCD*趋近于0时,表明年降水量分布越均匀,即降水在年内每天接近于平均分配;当*PCD*趋近于1时,则表明年降水量越集中于年内某一日,即该日降水量为年内最大的一天。*PCP*反映年最大降水量出现的时间,可将其转换为年内的日序数[12-13]。

黄土高原各站年降水量、*PCD*和*PCP*的长期趋势采用线性拟合计算[29],其显著性采用F检验,分为极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)、不显著($P>0.05$);空间插值利用ArcGIS软件反距离权重插值法完成[30],*PCD*、*PCP*与降水量的Pearson相关系数则在SPSS 26完成计算,其显著性分为极显著($\alpha<0.01$)、显著($\alpha<0.05$)、不显著($\alpha>0.05$)。

将1960—2019年、1999年前(1960—1999年)和1999年后(2000—2019年)分别记为T时段、T_1时段和T_2时段,计算各个时段的降水量、*PCD*和*PCP*的平均值及趋势,进而对比分析黄土高原退耕还林(草)工程前后变化差异特征。

2 结果与分析

2.1 黄土高原基本气候环境特征

由表1可知,1960—2019年黄土高原平均降水量为422.76 mm,以−0.148 mm·a^{-1}的速率呈减少趋势,略低于降水格点数据计算得出的减少幅度(1961—2017年)[23];全区年代际降水呈"V"型曲线变化,在1990s发生明显转折。因地理位置及水汽

表1　退耕还林(草)前后黄土高原降水量变化

Tab. 1　Changes of precipitation on the Loess Plateau before and after returning farmland to forest

区域	降水量均值/mm									降水量变化趋势/(mm·a⁻¹)		
	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	T时段	T_1时段	T_2时段	T时段	T_1时段	T_2时段
全区	449.88	423.89	409.67	399.83	405.50	450.77	422.76	420.82	426.63	−0.148	−1.478	4.350
高塬沟壑区(A)	442.98	416.97	398.07	400.56	398.52	449.95	417.84	414.64	424.23	0.021	−1.268	4.956
丘陵沟壑区(B)	494.52	445.56	432.04	426.45	433.34	509.28	456.86	449.64	471.31	0.186	−1.849	6.826
沙地农灌区(C)	321.24	308.72	281.62	290.48	284.05	331.45	302.93	300.52	307.75	0.033	−0.992	4.477
土石河谷区(D)	561.98	537.89	545.04	490.03	508.01	533.79	529.46	533.74	520.90	−0.855	−2.119	1.562

来源不同,黄土高原各生态区降水变化特征各异。从年均降水量来看,近60 a各生态区降水量由高到低为:土石河谷区、丘陵沟壑区、高塬沟壑区和沙地农灌区,分别为529.46 mm、456.86 mm、417.84 mm和302.93 mm。从变化趋势来看,除土石河谷区年均降水量呈减少趋势外,其余生态区降水均表现为增加趋势,其中以丘陵沟壑区增加最为明显(0.186 mm·a^{-1})。黄土高原各生态区降水年代际均表现出"先下降后上升"的变化特征,其中高塬沟壑区和沙地农灌区的降水年代际最低值出现在1980s,丘陵沟壑区和土石河谷区则出现在1990s;除土石河谷区年代际最高值出现在1960s外,其余3区均出现在2010s。2000—2019年相比1960—1999年,除黄土高原土石河谷区外,黄土高原全区、高塬沟壑区、丘陵沟壑区及沙地农灌区的年均降水量均有所增加,表明植被建设对黄土高原年降水量的增加具有积极作用[27]。其中,丘陵沟壑区的年均降水增加最为明显,达21.67 mm。1960—1999年黄土高原全区及各生态区降水量均表现出下降趋势,而2000—2019年期间降水量则全部转为增加趋势。

整体上,黄土高原地区年均降水量空间上表现出自东南向西北递减规律(图2a)。具体来看,黄土高原土石河谷区中南部汾渭平原、高塬沟壑区东南部以及丘陵沟壑区偏南地区的降水量均高于500

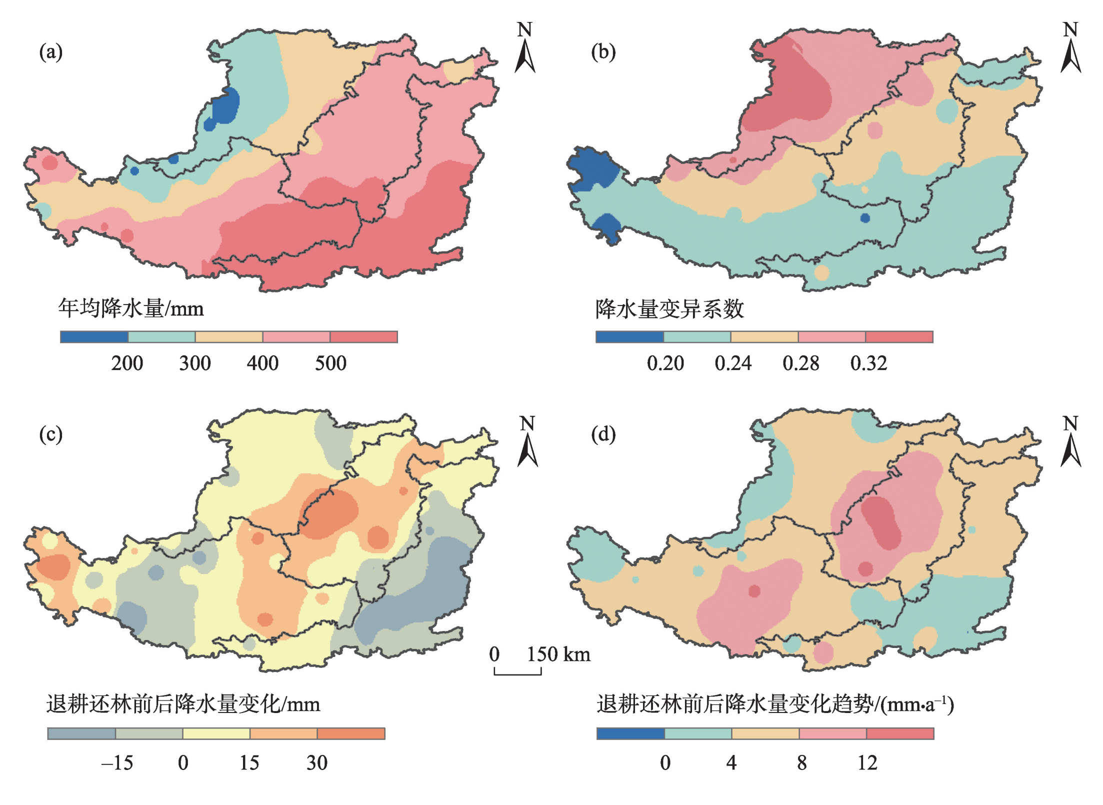


图2　黄土高原1960—2019年降水量(a)及其变异系数(b)、退耕还林(草)前后降水量(c)及其变化趋势(d)空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of precipitation (a) and its variation coefficient (b) during 1960−2019, precipitation (c) and its variation trend (d) on the Loess Plateau before and after the project of returning farmland to forest (grassland)

mm，呼和浩特至同仁一线东南地区的降水量在400~500 mm之间，300~400 mm降水集中分布在高塬沟壑区西北至沙地农灌区中东部的狭长地带，沙地农灌区中西部、高塬沟壑区中部偏北地区的降水量大概在200~300 mm之间，惠农、银川等极少部分年均降水量低于200 mm。从黄土高原降水量变异系数的空间分布上来看，整体上表现出南低北高特征，接近纬向地带性分布规律(图2b)。其中，高塬沟壑区西部南北两侧的降水量变异系数最低，说明其降水变化最为稳定；沙地农灌区偏西北地区降水量变化最不稳定，其变异系数在0.32以上。综合来看，1960—2019年黄土高原南部降水多且稳定，而西北地区降水少且不稳定。

2000—2019年相比1960—1999年，黄土高原降水量自东向西呈“偏少-偏多”相间分布规律(图2c)。其中丘陵沟壑区横山、离石及高塬沟壑区西宁等年均降水量增加最多；土石河谷区中部和东南部年均降水量减少最多，与该区处于亚洲季风与中纬度西风相互角力之地有关[31]。退耕还林(草)后，黄土高原降水量变化趋势一致偏多，其偏多程度自东南向西北呈“低-高-低”相间分布规律(图2d)。丘陵沟壑区内横山至绥德一带降水变化趋势偏多程度最高，达到12 mm·a^{-1}以上；此外，黄土高原高塬沟壑区中南部形成了降水变化趋势次级偏多中心，其偏多程度介于8~12 mm·a^{-1}。

2.2 黄土高原*PCD*和*PCP*时空特征

2.2.1 *PCD*和*PCP*的时间变化　1960—2019年黄土高原地区年均*PCD*大致在0.401~0.761之间波动，多年平均值为0.595，明显高于全国(1951—2012年)平均水平(0.15~0.25)[10]，说明黄土高原年内降水分配较为集中(图3a)，其年际变化呈倒“V”型曲线，并在1980s发生明显转折。总体上，近60 a黄土高原*PCD*以0.0014·(10a)$^{-1}$的幅度呈不显著下降趋势($P>0.05$)，与全国的趋势变化一致[10]，说明黄土高原年内降水集中程度逐渐减弱，年内日降水分布趋于均匀，但其变化幅度有限。从各生态区看(表2)，1960—2019年*PCD*由高到低排序为：沙地农灌区、丘陵沟壑区、高塬沟壑区和土石河谷区，分别为0.652、0.631、0.606和0.563。此外，高塬沟壑区、丘陵沟壑区和沙地农灌区*PCD*的年际变化特征同黄土高原全区一致，均呈倒“V”型曲线变化，但发生明显转折的年代略有差异；土石河谷区*PCD*的年际变

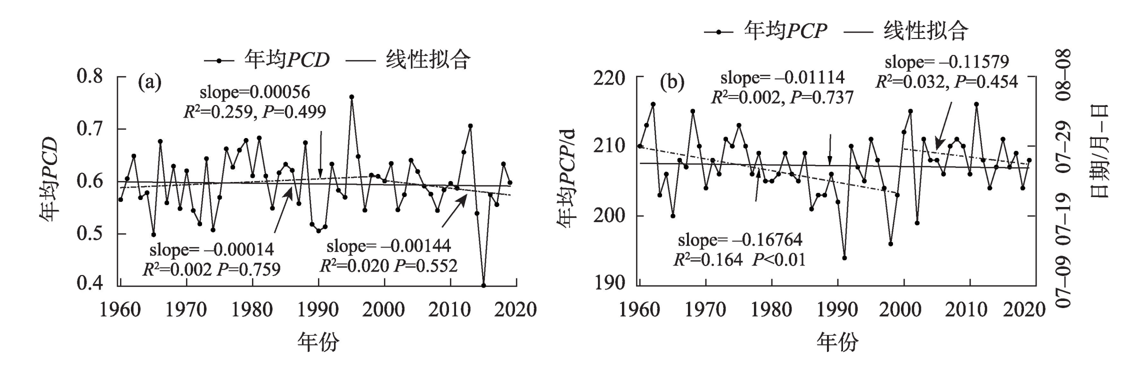


图3　1960—2019年黄土高原降水集中度(a)和集中期(b)时间变化

Fig. 3　Temporal variation of *PCD* (a) and *PCP* (b) on the Loess Plateau during 1960−2019

表2　退耕还林(草)前后黄土高原降水集中度变化

Tab. 2　Changes of *PCD* on the Loess Plateau before and after returning farmland to forest (grassland)

区域	*PCD*均值									*PCD*变化趋势/(10a)$^{-1}$		
	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	*T*时段	T_1时段	T_2时段	*T*时段	T_1时段	T_2时段
全区	0.588	0.603	0.607	0.598	0.591	0.585	0.595	0.599	0.588	−0.0014	0.0056	−0.0144
高塬沟壑区(A)	0.597	0.609	0.606	0.628	0.608	0.589	0.606	0.610	0.599	−0.0001	0.0106	−0.0185
丘陵沟壑区(B)	0.635	0.645	0.651	0.626	0.617	0.614	0.631	0.640	0.615	−0.0053	0.0006	−0.0025
沙地农灌区(C)	0.641	0.680	0.652	0.659	0.655	0.623	0.652	0.658	0.639	−0.0031	0.0074	−0.0292
土石河谷区(D)	0.554	0.572	0.589	0.532	0.562	0.567	0.563	0.562	0.565	−0.0015	−0.0047	−0.0202

化特征呈倒“S”型曲线。各生态区*PCD*均呈下降趋势，丘陵沟壑区降幅最大[0.0053·(10a)$^{-1}$]，其次是沙地农灌区[0.0031·(10a)$^{-1}$]、土石河谷区[0.0015·(10a)$^{-1}$]，高塬沟壑区最小[0.0001·(10a)$^{-1}$]。1999年之前黄土高原年均*PCD*为0.599，其波动程度较小；而1999年之后则变为0.588，但其波动较大，表明黄土高原退耕还林后(草)*PCD*有所减弱。*PCD*由退耕还林(草)前的上升趋势[0.0056·(10a)$^{-1}$]转为退耕还林(草)后的下降趋势[−0.0144·(10a)$^{-1}$]，且变化趋势均未通过0.05显著性水平检验。实施退耕还林(草)之后与之前相比，除土石河谷区*PCD*皆呈下降趋势外，其余3个区则均与黄土高原全区变化特征一致，趋势降幅由高到低排序为：沙地农灌区[0.0366·(10a)$^{-1}$]＞高塬沟壑区[0.0291·(10a)$^{-1}$]＞土石河谷区[0.0155·(10a)$^{-1}$]＞丘陵沟壑区[0.0031·(10a)$^{-1}$]。

近60 a来，黄土高原多年*PCP*为207.22 d，在194(7月12日)~216 d(8月3日)之间波动变化，说明黄土高原年内日最大降水量集中出现在7月中旬至8月初(图3b)，其年际呈“V”型曲线变化，在1990s发生明显转折。对黄土高原近60 a年内月平均降水量的计算发现，7月平均降水量最多，占全年总降水量的21.71%，其次是8月，为21.19%，与*PCP*年内分布特征一致。总体上，黄土高原*PCP*以−0.1114 d·(10a)$^{-1}$速率呈下降趋势($P>0.05$)，表明黄土高原年内最大降水日期逐渐提前。从各生态区看(表3)，年均*PCP*由早到晚为：高塬沟壑区、土石河谷区、丘陵沟壑区和沙地农灌区，分别为206.24 d、207.51 d、207.52 d和207.81 d。此外，高塬沟壑区和土石河谷区*PCP*的年际变化特征同黄土高原全区一致，均呈“V”型曲线变化，且均在1990s发生明显转折；而丘陵沟壑区和沙地农灌区的年际变化呈倒“S”型曲线。近60 a来，除丘陵沟壑区*PCP*有所推迟外，其他3个生态区均有所提前，其中高塬沟壑区提前最为明显[0.168 d·(10a)$^{-1}$]，其次是土石河谷区[0.044 d·(10a)$^{-1}$]，沙地农灌区最小[0.043 d·(10a)$^{-1}$]。1999年之前黄土高原年均*PCP*为206.58 d，其波动程度较大，而1999年之后则为208.5 d，波动较小；两阶段的*PCP*均呈下降趋势，且退耕还林(草)之后下降幅度低于退耕还林(草)之前，表明黄土高原退耕还林(草)后*PCP*有所推迟。实施退耕还林(草)之后与之前相比，除土石河谷区*PCP*下降幅度增大外，其余3区均与黄土高原全区变化特征一致，趋势降幅排序为：沙地农灌区[1.497 d·(10a)$^{-1}$]＞高塬沟壑区[0.792 d·(10a)$^{-1}$]＞丘陵沟壑区[0.753 d·(10a)$^{-1}$]。

2.2.2　*PCD*和*PCP*的空间变化

1960—2019年黄土高原各站年均*PCD*在0.485~0.692，表明黄土高原年内降水集中程度比较高(图4a)。整体上，黄土高原地区年均*PCD*呈现出自东南向西北逐渐递减的空间特征，纬向地带性规律明显，说明黄土高原年内降水由西北向东南越来越均匀，即随着降水量的增加，年内*PCD*越低，与刘宪锋等[26]研究结论基本一致。从图4b可知，黄土高原地区年均*PCP*整体差异不大，在203.72~209.17 d之间(即在7月下旬)，空间整体上呈现自东向西逐渐递减特征。具体来看，丘陵沟壑区东南部至沙地农灌区东部一带的*PCP*最迟，而高塬沟壑区西部的门源至临洮一带的*PCP*最早。图4c~图4d显示了黄土高原各站*PCD*和*PCP*的变化趋势，近60 a来，黄土高原地区*PCD*自东北向西南呈“下降-上升-下降”相间分布规律；其中有17个气象站点的*PCD*呈逐渐增强趋势，以高塬沟壑区西南部的武功站[0.0121·(10a)$^{-1}$]增幅最为明显，而降幅最为明显的气象站点为丘陵沟壑区东北部的右玉[−0.0127·(10a)$^{-1}$]。对于*PCP*而言，黄土高原地区整体上表现出东部推迟、西部提前的态

表3　退耕还林(草)前后黄土高原降水集中期变化

Tab. 3　Changes of PCP on the Loess Plateau before and after returning farmland to forest (grassland)

区域	*PCP*均值/d									*PCP*变化趋势/[d·(10a)$^{-1}$]		
	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	*T*时段	T_1时段	T_2时段	*T*时段	T_1时段	T_2时段
全区	208.80	208.20	205.30	204.00	209.00	208.00	207.22	206.58	208.50	−0.111	−1.676	−1.158
高塬沟壑区(A)	208.08	207.13	204.19	203.26	208.12	206.66	206.24	205.67	207.39	−0.168	−1.743	−0.951
丘陵沟壑区(B)	208.33	209.04	204.95	204.95	209.30	208.58	207.52	206.82	208.94	0.085	−1.247	−0.494
沙地农灌区(C)	208.55	210.01	205.49	204.58	209.13	209.08	207.81	207.16	209.11	−0.043	−1.597	−0.100
土石河谷区(D)	208.95	207.73	206.37	203.88	209.93	208.24	207.51	206.73	209.09	−0.044	−1.577	−2.716

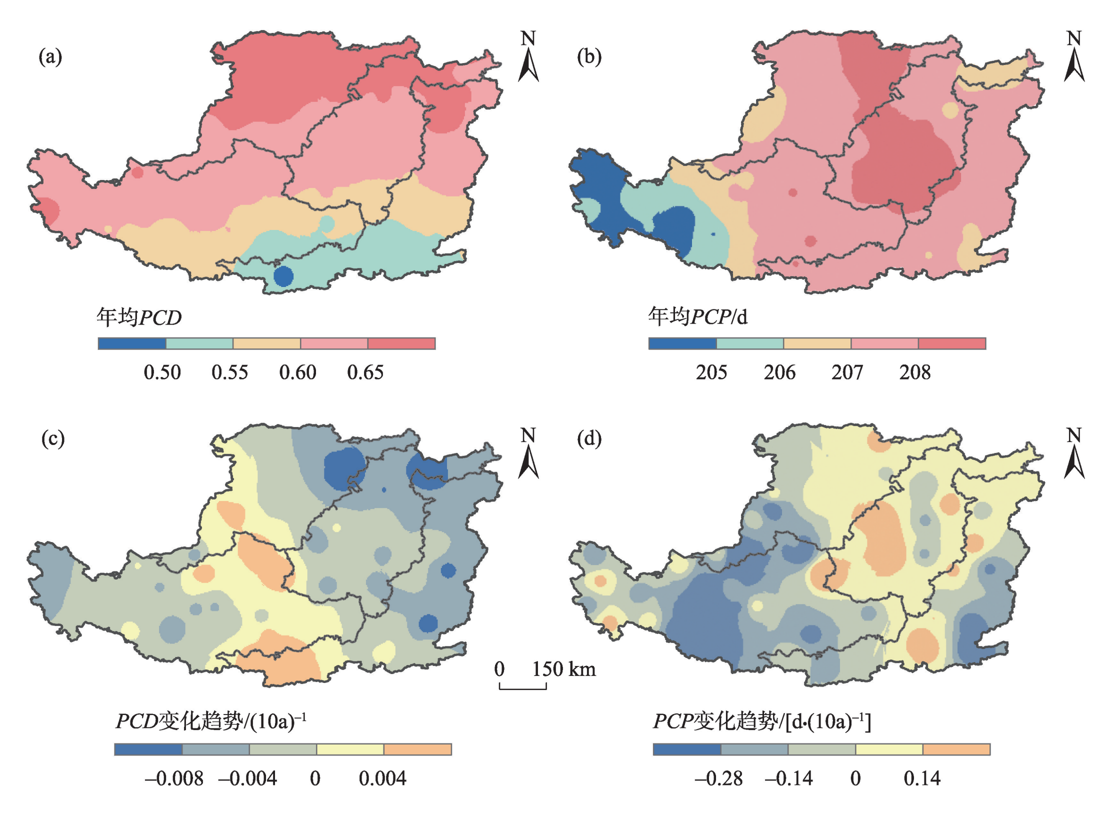


图4　黄土高原年均降水集中度(a)和集中期(b)及其变化趋势(c、d)空间分布

Fig. 4　Spatial pattern of average annual *PCD* (a), *PCP* (b) and their change trend (c, d) on the Loess Plateau during 1960−2019

势,其中有24个气象站点的*PCP*呈逐渐推迟趋势,以丘陵沟壑区西部的吴起站[0.590 d·(10a)$^{-1}$]推迟最为明显,而提前最为明显的气象站点为高塬沟壑区中部的华家岭[−0.690 d·(10a)$^{-1}$]。综上所述,近60 a来黄土高原*PCD*和*PCP*变化组合特征在空间上表现不一致,即中部和东部年内降水趋于均匀、最大降水日数推迟,而西部地区年内降水趋于集中、最大降水日数有所提前。

为了进一步了解退耕还林(草)工程对黄土高原地区*PCD*和*PCP*的影响,本文分别计算了黄土高原各气象站点1999年前后年均*PCD*、*PCP*及变化趋势,并利用1999年之后减去1999年之前对应值,结果如图5所示。2000—2019年相比1960—1999年,黄土高原年均*PCD*自东北向西南呈"偏低-偏高-偏低"相间分布规律(图5a)。*PCD*偏高的地区主要集中在高塬沟壑区东部、沙地农灌区西部及土石河谷区南部,其中以陕西武功站偏高幅度最为明显(0.0637);黄土高原东北部*PCD*偏低程度最为明显,偏低幅度超过了0.0036。黄土高原的年均*PCP*以偏高为主,偏高幅度呈南多北少、东多西少态势(图5b)。*PCP*偏多的地区主要集中在4个生态区交界地带、沙地农灌区西南部,其中以宁夏中卫和陕西绥德偏多幅度最为明显(3.825 d);而偏少的地区只有陇东地区华家岭站(−0.275 d)。黄土高原在实施退耕还林(草)之后,*PCD*趋势偏高的地区主要集中在丘陵沟壑区中东部、土石河谷区中部(图5c),偏高幅度最多的地区超过了0.027·(10a)$^{-1}$;而趋势偏低的地区集中分布在高塬沟壑区、沙地农灌区以及土石河谷区南部和北部,其中在黄土高原西北部有15个站点偏低幅度超过了0.045·(10a)$^{-1}$。黄土高原在实施退耕还林(草)之后,PCP趋势偏高的地区集中在沙地农灌区、高塬沟壑区中部和北部、丘陵沟壑区大部分以及土石河谷区中北部(图5d),其中沙地农灌区的东胜和包头偏高幅度最多,超过了4.02 d·(10a)$^{-1}$;而趋势偏低的地区集中在黄土高原东南部,其中偏低幅度最多超过了2.15 d·(10a)$^{-1}$。

2.3　*PCD*和*PCP*与年降水量的相关分析

由图6a可知,除黄土高原西南部贵德气象站外,其余各气象站*PCD*与年降水量皆呈正相关,相关系数介于0.046~0.504之间,再次验证了黄土高原

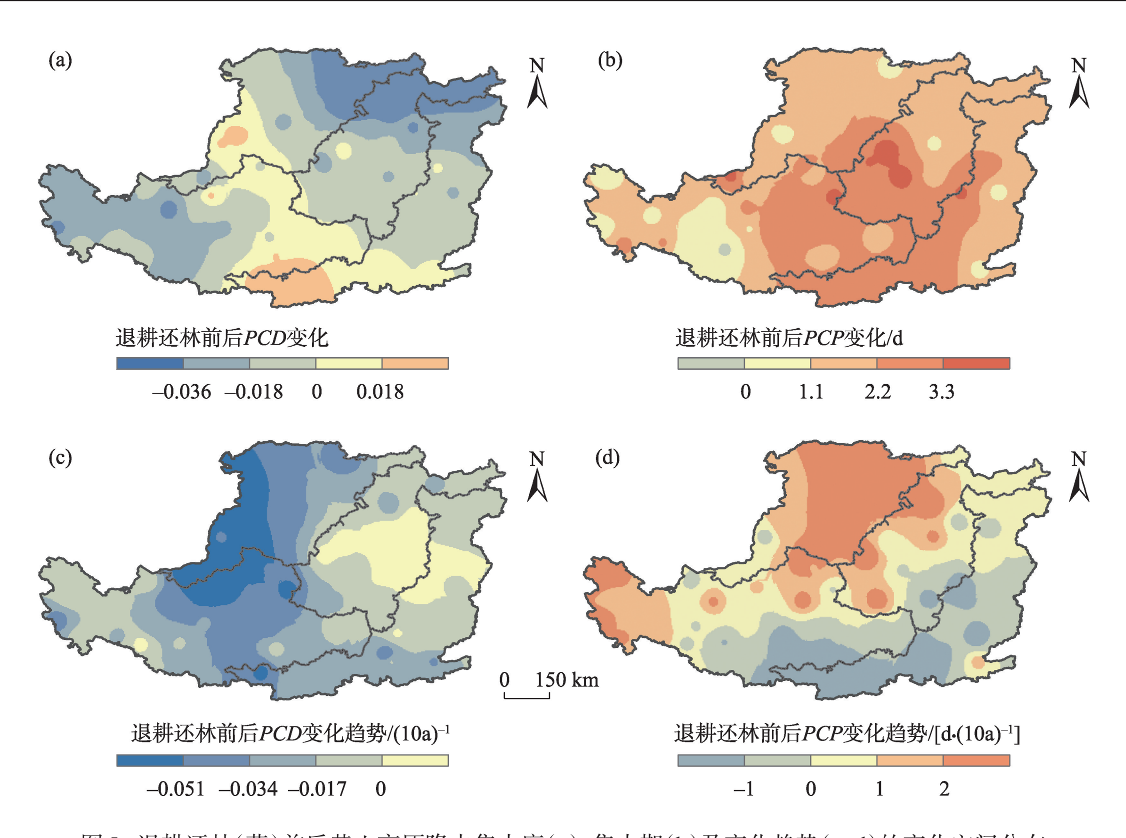


图5　退耕还林(草)前后黄土高原降水集中度(a)、集中期(b)及变化趋势(c、d)的变化空间分布

Fig. 5　Spatial pattern of *PCD* (a), *PCP* (b) and their change trend (c, d) on the Loess Plateau before and after the project of returning farmland to forest (grassland)

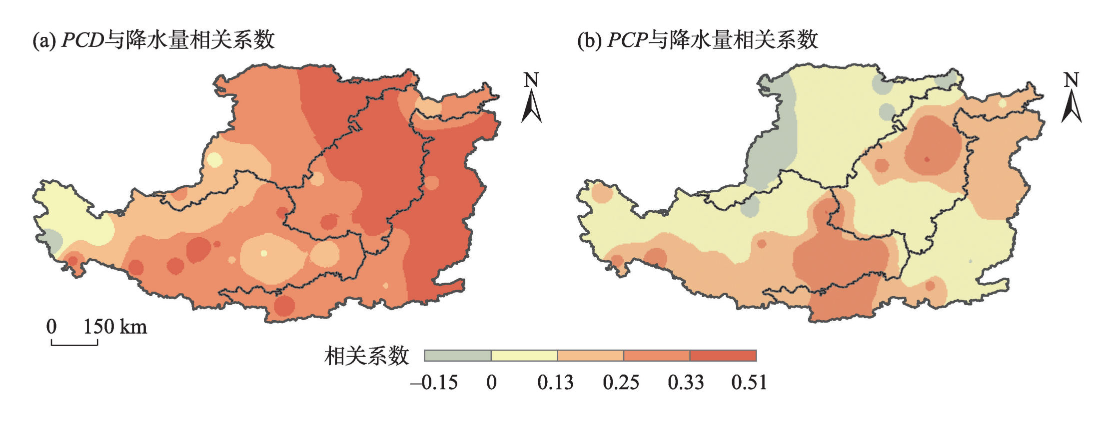


图6　黄土高原降水量与降水集中度(a)和集中期(b)相关系数的空间分布

Fig. 6　Spatial pattern of correlation coefficient between precipitation and *PCD* (a), *PCP* (b) on the Loess Plateau

地区年降水量越大,年内降水越集中的结论。其中,在黄土高原东北部广大地区的*PCD*与年降水量的相关系数超过了0.33($\alpha<0.01$),而在黄土高原中部的相关系数达到0.25~0.33($\alpha<0.05$),通过显著性检验的气象站点占全区的63.63%。黄土高原地区*PCP*与年降水量的相关性以正相关为主,但相关性较小(图6b)。值得注意的是,黄土高原西部沿黄河一带的*PCP*与年降水量表现出负相关,其中以银川气象站的-0.086最为明显。总体而言,黄土高原地区年降水量与*PCD*具有较好的正相关,与*PCP*的相关性较差,这与刘宪锋等[26]研究结果一致,该特征也在滦河流域[18]有所体现。

3　讨 论

黄土高原地处大陆性季风气候区,生态环境较

为脆弱。自1960s以来，黄土高原地区对气候变化响应极为敏感，年均气温显著上升且高于同期全国升温幅度，在1995年出现变暖速率放缓的突变[32]；且极端最高与最低气温等极端气温指数均有所增加[33]，地表温度高于气温增速[34]。本文研究发现，1960—2019年黄土高原地区年均降水量呈减少趋势，与以往研究所得结论基本一致[25]；此外，相关研究表明，黄土高原地区蒸发皿蒸发呈下降趋势[35]。研究期内，黄土高原年均*PCD*偏大但有微小幅度的减弱态势，年内降水集中在7月中旬至8月初且略有提前，极端降水量及降水日数均有所增加[35]，使得暴雨洪涝风险增加。如2017年7月陕北无定河流域出现特大暴雨，引起老梯田、坡耕地土壤侵蚀，淤地坝和小型水库冲毁，多个水文站洪峰流量创历史记录[36]。

自1999年大规模实施"退耕还林(草)"工程建设以来，黄土高原植被覆盖显著增加[37]，植被蒸腾作用有所增加[38]，致使陆地水储量减少[39]。退耕还林(草)前，黄土高原地区处于降水量下降、*PCD*上升、*PCP*下降阶段，之后转为降水量增加、*PCD*和*PCP*均下降阶段，表明黄土高原植被恢复不仅能够增加局地降水[27]，还影响了该地区年内降水分配，但植被恢复是否直接影响*PCD*和*PCP*的机制还需进一步探讨。对于地处干旱半干旱区的黄土高原而言，因其地下水埋藏深、地表水量小且难以利用等原因，降水资源成为该区域植被恢复最主要的水分来源[40]。植被覆盖显著增加后，降水的增加对黄土高原地区的植被恢复、生态保护和高质量发展具有重要的理论与现实意义。进一步研究发现，黄土高原地区*PCD*、*PCP*与年降水量的相关系数均以正相关为主，说明黄土高原地区年降水量越大，该区域年内降水越集中于某个时段内，日最大降水量也会相应增大，发生洪涝灾害、极端降水的可能性加大。此外，因地理位置及水汽来源不同，黄土高原年内降水分配情况空间格局不一致，年内降水由西北向东南越来越均匀，*PCP*自东向西逐渐递减。

黄土高原地区*PCD*变化在0.401~0.761之间，因研究时段、气象站点数据等不同，大于该区1959—2008年的变化范围(0.53~0.75)[26]；年均*PCD*高于内蒙古[41]、滦河流域[18]，但低于淮河流域[20]，与全国[10]、滦河流域[18]的下降趋势一致，与淮河流域的上升趋势相反[20]。黄土高原地区年均*PCP*稍晚于全国[10]、

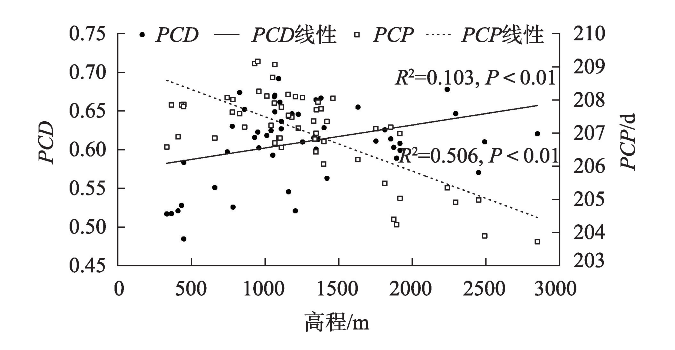


图7 黄土高原55个气象站点的降水集中度和集中期与高程的散点图

Fig. 7 Scatter plot of precipitation concentration, concentration period and elevation at 55 stations on the Loess Plateau

内蒙古[41]、滦河流域[18]，但同样具有提前趋势。对比发现，黄土高原高塬沟壑区、丘陵沟壑区、沙地农灌区和土石河谷区的降水量、*PCD*及*PCP*指标的排序并不一致，表明*PCD*和*PCP*不仅受降水影响，可能还受地形、太阳黑子、ENSO等[11]因素的综合影响。将黄土高原55个气象站点的*PCD*和*PCP*与高程数据进行相关性分析(图7)可以看出，黄土高原地区*PCD*、*PCP*与高程的相关系数分别为0.346、-0.718，均通过了极显著检验水平($\alpha<0.01$)，表明在地势较高的黄土高原*PCD*更大、降水更为集中，*PCP*则更早；但对嘉陵江流域[11]、珠江流域[42]的研究发现，地形与*PCD*呈负相关，其差异性有待进一步探讨。

受黄土高原地区降水等基础数据影响，未考虑基于地形地貌因素对空间插值的影响，本文浅要分析了该区域*PCD*与*PCP*及其趋势的时空变化规律，以及与降水本身、地形的关系。降水的分配研究受多种因素的综合影响，包括人类活动的影响，*PCD*、*PCP*也将变得更加复杂。究竟人类活动以及降水本身、大气环流等自然地理因素对黄土高原地区*PCD*与*PCP*的空间格局和趋势变化会造成什么程度的影响，其内在的成因机制还有待进一步探讨。

4 结 论

根据黄土高原55个气象站点1960—2019年逐日降水资料，计算各站点降水集中度(*PCD*)和降水集中期(*PCP*)，结合气候统计学等方法，分析总结了该地区降水不均匀时空变化特征。得出如下结论：

(1) 时间分布上，黄土高原年均降水量为

422.76 mm，以-0.148 mm·a⁻¹的速率呈减少趋势；*PCD*多年平均值为0.595，以0.0014·(10a)⁻¹的幅度呈不显著下降趋势($P>0.05$)；*PCP*主要在194(7月12日)~216 d(8月3日)之间波动变化，以-0.1114 d·(10a)⁻¹速率呈下降趋势($P>0.05$)。1960—2019年各生态区降水量为：土石河谷区>丘陵沟壑区>高塬沟壑区>沙地农灌区，*PCD*为：沙地农灌区>丘陵沟壑区>高塬沟壑区>土石河谷区，*PCP*为：沙地农灌区>丘陵沟壑区>土石河谷区>高塬沟壑区。

(2) 空间分布上，黄土高原地区年均降水量空间上表现出自东南向西北递减规律；年均*PCD*表现出自东南向西北逐渐递减、年内降水由西北向东南越来越均匀；年均*PCP*整体差异不大，空间整体上呈现自东向西逐渐递减特征。*PCD*趋势变化自东北向西南呈"下降-上升-下降"相间分布规律，*PCP*整体上表现出东部推迟、西部提前的态势。

(3) 2000—2019年相比1960—1999年，黄土高原年均降水量有所增加、*PCD*减弱、*PCP*有所推迟。退耕还林(草)工程后，黄土高原降水自东向西呈"偏少-偏多"相间分布，其变化趋势以偏多为主，偏多程度自东南向西北呈"低-高-低"相间分布规律；*PCD*自东北向西南呈"偏低-偏高-偏低"分布规律，其变化趋势以偏低为主，空间上呈东部偏高、西部偏低；*PCP*以偏高为主，偏高幅度呈南多北少、东多西少态势，其变化趋势以偏多为主，呈东南偏少、西北偏多格局。

(4) 1960—2019年，黄土高原地区*PCD*、*PCP*与年降水量均以正相关为主，通过显著性检验的气象站点占全区的63.63%、7.27%。

参考文献(References)：

[1] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从AR5到AR6的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667-671. [Zhou Botao. Global warming: Scientific progress from AR5 to AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 667-671.]

[2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[3] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48. [Fan Xing, Qin Yuanyuan, Gao Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 Working Group I Report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(Z2): 44-48.]

[4] 孔锋. 透视大尺度综合自然灾害风险评估的主要进展和展望[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 148-153. [Kong Feng. Perspective on the main progress and prospect of large-scale integrated natural disaster risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(2): 148-153.]

[5] 黄萌田, 周佰铨, 翟盘茂. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 17-27. [Huang Mengtian, Zhou Baiquan, Zhai Panmao. Impacts of extreme weather and climate events on desertification, land degradation and food security[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 17-27.]

[6] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J]. Journal of Climate, 2006, 19(21): 5686-5699.

[7] 谢正辉, 陈思, 秦佩华, 等. 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 801-813. [Xie Zhenghui, Chen Si, Qin Peihua, et al. Research on climate feedback of human water use and its impact on terrestrial water cycles: Advances and challenges[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 801-813.]

[8] 苏爱芳, 吕晓娜, 崔丽曼, 等. 郑州"7.20"极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(5): 445-454. [Su Aifang, Lyu Xiao'na, Cui Liman, et al. The basic observational analysis of "7.20" extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(5): 445-454.]

[9] 郑炎辉, 陈晓宏, 何艳虎, 等. 珠江流域降水集中度时空变化特征及成因分析[J]. 水文, 2016, 36(5): 22-28. [Zheng Yanhui, Chen Xiaohong, He Yanhu, et al. Spatial-temporal variation of precipitation concentration degree in Pearl River Basin and its causes[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 22-28.]

[10] 孔锋, 方佳毅, 刘凡, 等. 1951—2012年中国降水集中度和集中期的时空格局[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(4): 404-411. [Kong Feng, Fang Jiayi, Liu Fan, et al. Variations in the spatiotemporal patterns of precipitation concentration degree and precipitation concentration period from 1951 to 2012 in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2015, 51(4): 404-411.]

[11] 杨军, 张会兰, 庞建壮. 嘉陵江流域降水集中度的时空变异与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4): 849-860. [Yang Jun, Zhang Huilan, Pang Jianzhuang. Study on spatial-temporal variation and driving factors of precipitation concentration in Jialing River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(4): 849-860.]

[12] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.

[13] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 51(4): 622-630. [Zhang Lujun, Qian Yongfu. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River Valley of China

[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 51(4): 622-630.]

[14] Martin Vide J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(8): 959-971.

[15] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: a comparative index [J]. Professional Geographer, 1980, 32(3): 300-309.

[16] Michiels P, Gabriels D, Harrmann R. Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing the monthly rainfall distribution in Spain[J]. Catena, 1992, 19(1): 43-58.

[17] 王晥, 陆尔, 赵玮, 等. 一种新的反映我国降水季节内非均匀性特征的方法[J]. 热带气象学报, 2015, 31(5): 655-663. [Wang Huan, Lu Er, Zhao Wei, et al. A new method to reflect the intra-seasonal heterogeneity of the precipitation in China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2015, 31(5): 655-663.]

[18] 董满宇, 王磊鑫, 李洁敏, 等. 1960—2017年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 468-475. [Dong Manyu, Wang Leixin, Li Jiemin, et al. Spatial-temporal variations in intra-annual precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Luanhe River Basin from 1960-2017[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2019, 55(4): 468-475.]

[19] 叶正伟, 殷鹏. 淮河流域汛期候尺度降水集中度与集中期的时序变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 295-299. [Ye Zhengwei, Yin Peng. Changes of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in flood season in the Huaihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 295-299.]

[20] 庞欣欣. 淮河流域降水集中度和集中指数年际变化分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 43-47. [Pang Xinxin. Inter-annual variations of precipitation concentration degree and concentration index in Huaihe River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(9): 43-47.]

[21] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299. [Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299.]

[22] 肖蓓, 崔步礼, 李东昇, 等. 黄土高原不同气候区降水时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(1): 51-61. [Xiao Bei, Cui Buli, Li Dongsheng, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in different climatic regions of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(1): 51-61.]

[23] 李明, 邓宇莹, 曹富强, 等. 基于格点数据的黄土高原降水时空变化特征[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, 53(1): 130-136. [Li Ming, Deng Yuying, Cao Fuqiang, et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation in the Loess Plateau based on grid data[J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2021, 53(1): 130-136.]

[24] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠. 1965—2013年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 43-50. [Zhao Anzhou, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2017, 53(1): 43-50.]

[25] 安彬, 肖薇薇, 张淑兰, 等. 1960—2017年黄土高原不同等级降水日数和强度时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 714-723. [An Bin, Xiao Weiwei, Zhang Shulan, et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation days and intensity with different grades in the Loess Plateau during 1961-2017[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 714-723.]

[26] 刘宪锋, 任志远, 张翀, 等. 1959—2008年黄土高原地区年内降水集中度和集中期时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1157-1163. [Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. Inhomogeneity characteristics of intra-annual precipitation on the Loess Plateau during 1959-2008[J]. Progress in Geography, 2012, 31(9): 1157-1163.]

[27] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1080-1091. [Zhang Baoqing, Tian Lei, Zhao Xining, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2021, 51(7): 1080-1091.]

[28] Wang X L, Chen H, Wu Y, et al. New techniques for detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(12): 2416-2436.

[29] 徐建华. 计量地理学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2014. [Xu Jianhua. Quantitative Geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014.]

[30] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2012. [Tang Guo'an, Yang Xin. Experimental Course on Spatial Analysis of Geographic Information Systems[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.]

[31] 刘焕才, 许芃, 李曼. 山西夏季不同等级降水时空演变特征及其影响要素研究[J]. 地理科学, 2021, 41(3): 544-552. [Liu Huancai, Xu Peng, Li Man. Spatio-temporal characteristics of summer graded precipitation and its influencing factors in Shanxi[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 544-552.]

[32] 刘荔昀, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631. [Liu Liyun, Lu Ruijie, Ding Zhiyong, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12(6): 615-631.]

[33] Ding Zhiyong, Pu Jia, Meng Lihong, et al. Asymmetric trends of extreme temperature over the Loess Plateau during 1998-2018[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(S1): 1663-1685.

[34] 安彬, 肖薇薇, 张淑兰, 等. 1960—2017年黄土高原地表温度时

空变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 778−785. [An Bin, Xiao Weiwei, Zhang Shulan, et al. Spatial and temporal characteristics of surface temperature in the Loess Plateau during 1961−2017[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 778−785.]

[35] Ren Yuling, Zhang Jingpeng, Fu Jinxia, et al. Spatiotemporally varied extreme precipitation events simultaneously controlled by multiple circulation factors in China's Loess Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2022: 1−22. https: //doi.org/10.1002/joc.7593.

[36] 党维勤, 党恬敏, 张泉, 等. "7·26"暴雨调查对黄土高原水土保持工作的启示[J]. 中国水土保持, 2021, 42(3): 24−27. [Dang Weiqin, Dang Tianmin, Zhang Quan, et al. Enlightenment of investigation of July 26 rainstorm on soil and water conservation in Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021, 42(3): 24−27.]

[37] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 224−230, 241. [Zhang Jiazheng, Li Chonggui, Wang Tao. Dynamic changes of vegetation coverage on the Loess Plateau and its factors[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 224−230, 241.]

[38] 张耀宗, 张勃, 张多勇, 等. 1960—2018年黄土高原地区蒸发皿蒸发时空变化特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 1−9. [Zhang Yaozong, Zhang Bo, Zhang Duoyong, et al. Spatio temporal patterns of pan evaporation from 1960 to 2018 over the Loess Plateau: Changing properties and possible causess[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 1−9.]

[39] 禤键豪, 张兴福, 陈鑑华, 等. 利用COST-G GRACE时变模型反演黄土高原陆地水储量变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(5): 510−514. [Xuan Jianhao, Zhang Xingfu, Chen Jianhua, et al. Terrestrial water storage changes in the Loess Plateau based on COST-G GRACE temporal model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(5): 510−514.]

[40] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 151(4) : 437−448.

[41] 任志艳, 延军平, 王鹏涛. 1960—2012年内蒙古降水集中度和降水集中期时空变化[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 760−766. [Ren Zhiyan, Yan Junping, Wang Pengtao. Spatio-temporal variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 760−766.]

[42] Zheng Yanhui, He Yanhu, Chen Xiaohong. Spatiotemporal pattern of precipitation concentration and its possible causes in the Pearl River Basin, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1020−1031.

Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019

AN Bin[1,2], XIAO Weiwei[1,2], ZHU Ni[1,2], LIU Yufeng[3]

(1. School of Tourism & Environment/Academician and Expert Workstation of Shanxi Province, Ankang University, Ankang 725000, Shaanxi, China; 2. Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang 725000, Shaanxi, China; 3. College of Resource & Environment and Historical Culture, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: With global warming as a foundation, it is significantly important that the law of precipitation concentration degree (*PCD*) and precipitation concentration period (*PCP*) changes for the Loess Plateau are clarified for the conservation of regional soil and water and utilization of water resources. Based on the daily precipitation observation data compiled from 55 meteorological stations on the Loess Plateau from 1960 to 2019, the temporal and spatial variation characteristics of *PCD* and *PCP* on the Loess Plateau in the last 60 years, along with before and after the project of returning farmland to forest (grassland), were analyzed using trend analysis, spatial interpolation, and correlation analysis. The average annual precipitation, *PCD*, and *PCI* on the Loess Plateau had a decreasing (downward) trend from 1960 to 2019 according to the results. In addition, the *PCD* gradually weakened, and the *PCI* shifted to an earlier date. The spatial distribution characteristics of annual precipitation, *PCD* and *PCI* on the Loess Plateau were complex. Annual precipitation and the *PCD* decreased from southeast to northwest, while *PCP* gradually decreased from east to west. However, the difference was not significant. The variation trend of the *PCP* had an alternating distribution law of “decline rise decline” from northeast to southwest. Overall, the *PCP* had a trend of delaying in the east and advancing in the west. After the project of returning farmland to forest (grassland) was completed, the average annual precipitation increased, the *PCD* weakened, and the *PCP* was postponed. The precipitation on the Loess Plateau is distributed alternately from east to west, and its change trend is mainly more. The distribution law of *PCD* is “low high low” from northeast to southwest, and its variation trend is mainly low. The *PCP* is mainly on the high side, and the range of the high side is more in the south than the north and more in the east than the west, and the trend change is mainly on the high side. The *PCD*, *PCI*, and annual precipitation in the Loess Plateau are mainly positively correlated.

Keywords: precipitation concentration degree (*PCD*); precipitation concentration period (*PCP*); returning farmland to forest (grassland) project; ecological zoning; Loess Plateau